

## 変圧器巻線の周波数応答解析（FRA）診断を想定した電磁界モデルの作成と伝達関数評価に関する研究

著者	菊池 秀平
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	90
号	1
ページ	72-73
発行年	2021-08-20
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00132815">http://hdl.handle.net/10097/00132815</a>

修士学位論文要約 (令和 3 年 3 月)

## 変圧器巻線の周波数応答解析 (FRA) 診断を想定した電磁界モデルの作成 と伝達関数評価に関する研究

菊池 秀平

指導教員：斎藤 浩海, 研究指導教員：八島 政史

### A Study on Electromagnetic Model and Transfer Function Evaluation Assuming FRA Diagnosis for Transformer Winding

Shuhei KIKUCHI

Supervisor : H. SAITOH, Research Advisor : M. YASHIMA

Winding deformation is one of the major reasons behind the power transformer failures. Winding deformation may result from very large electromagnetic forces generated when high short circuit current flows into the windings. Though the minor winding deformations do not necessarily lead to an immediate transformer failure, however, its mechanical integrity is greatly reduced to withstand future mechanical and electrical stresses. Therefore, the detection of minor winding deformation is very essential to take immediate remedial actions. Frequency response analysis (FRA) is effective, non-destructive, and non-intrusive method to detect various mechanical faults within power transformers without internal inspection.

#### 1. はじめに

電力用変圧器経は高経年化により、絶縁紙やプレスボードの機械的耐力が低下することがある。これが起点となり、巻線の位置ずれの発生の恐れがある。巻線の位置ずれによって、想定以上の電磁力が発生し、変圧器を破壊に至らしめる可能性がある。そこで、変圧器の巻線位置ずれを検出する手法として、周波数応答解析 (Frequency Response Analysis : FRA) が注目されている。

#### 2. FRA 伝達関数と三次元電磁界モデル

FRA は巻線端子間や巻線間で、例えば数 10Hz の低周波領域から数 MHz の高周波領域まで連続的に測定した伝達関数を参照データと比較し、その変化から巻線の変形や位置ずれ等を検出する手法である。伝達関数は入力電圧と出力電圧の比で定義される。周波数を掃引することで、従来の短絡インピーダンスの単一での周波数よりも情報量が増える利点がある。しかしながら、伝達関数の結果を解釈する客観的な手法は確立されておらず、伝達関数の解釈は現場の熟練者に委ねられている。異常診断のための客観的な手法を確立するためにはデータの蓄積が必要であるが、活用できる実変圧器には限りがある。欧州を中心に、実変圧器に対して様々な変圧器の異常を施した伝達関数測定を行い、データの蓄積がなされているが、まだ不十分であるのが現状である。そこで幾何学的構造を模擬した三次元電磁界解析モデルによる伝達関数の解析に期待が持たれている。

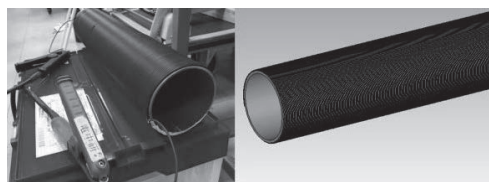


図 1 作成した単一巻線モデルと解析モデル

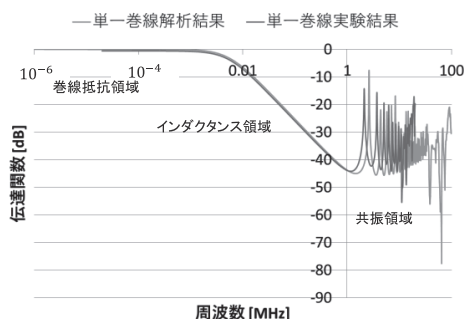


図 2 単一巻線モデルに対する伝達関数

#### 3. 単一巻線モデルの検討

実験と解析の比較を行う最初のステップとして、図 1 に示す単一巻線モデルを作成した。実験モデルは外径 145mm, 巻線長 550mm, 巻数 220 ターンである。解析モデルでは絶縁被覆を無視したため、外径は 143.4mm である。解析モデルは電磁界解析ソフト CST Studio (開発元: ダッソーシステムズ) 上で作成した。図 2 に単一巻線モデル

に対する実験と解析で求めた伝達関数を示す。伝達関数は周波数帯により、巻線抵抗領域、インダクタンス領域、共振領域に分けられる。巻線抵抗領域、インダクタンス領域では両者は良く一致している。実験結果の共振周波数がわずかに低周波数側にあるのは、伝達関数の実測時に近接物の影響を完全には排除できていないことによると考えられる。このことを考慮に入れても、電磁界解析モデルを用いたFRA診断は可能と考えられる。

#### 4. 二重巻線構造モデルに対する位置ずれの検討

実変圧器の構造に近づけるために、単一巻線モデルを二重構造にした、二重巻線構造モデルを作成した。二重巻線モデルを図3(左:解析モデル, 右:実験モデル)に示す。実験モデルと解析モデルはともに巻線長:300mm, 巻数:120ターンである。実験モデルでは外側巻線外径:145mm, 内側巻線外径:120mmである。解析モデルは絶縁被覆を省略したため、外側巻線外径:143.4mm 内側巻線外径:118.4mmである。巻線異常の中で、位置ずれに対する伝達関数の変化を考察するために、二重巻線的一方を軸方向に変位させた。内側巻線を巻線長方向に0mm, 50mm, 100mmの位置ずれを与えた場合の伝達関数について、測定と解析を行った。二重巻線構造において、伝達関数を測定する測定種別として、入力電圧( $V_i$ )および出力電圧( $V_o$ )を測定する端子の状況(開放, 短絡および接地)の違いにより、(a) 端子間開放測定, (b) 端子間短絡測定, (c) 巻線間容量性測定, (d) 巻線間誘導性測定の4種類が存在する。4種の測定種別ごとの伝達関数測定結果を図4に示す。同様に、4種の測定種別ごとの伝達関数の解析結果を図5に示す。図4と図5に示されるように、それぞれの測定において、自己インダクタンス、漏れインダクタンス、巻線間静電容量、相互インダクタンスといった物理量の特徴が現れる領域が存在し、実験と解析ともにその領域に着目した場合に傾向はよく一致している。本検討での最小位置ずれ検出量を評価するため、第一共振周波数や振幅変化量について表1にまとめる。実験と解析ともに、端子間短絡測定と巻線間誘導性測定が巻線位置ずれ検出に有効であると考えられる。

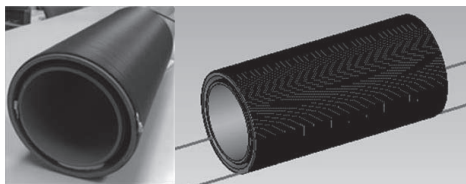


図3 二重巻線構造モデル

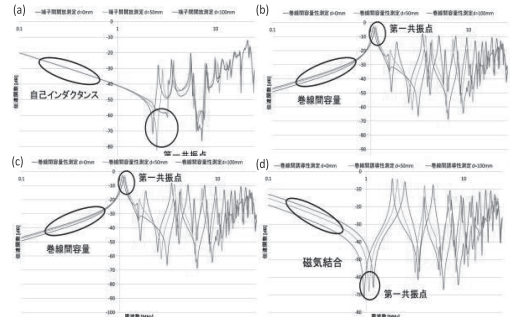


図4 伝達関数測定結果 (d=0, 50, 100mm)

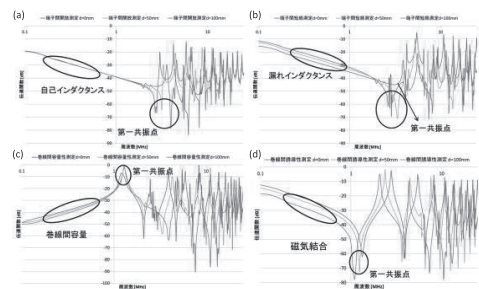


図5 伝達関数解析結果 (d=0, 50, 100mm)

表1 共振周波数変化率と振幅の変化量

測定方法	第一共振周波数[MHz]			曲線部	
	d=0	d=50	変化率[%]	変化量[dB]	
(a)端子間開放測定	2.29	2.5	9.17>1	0	
(b)端子間短絡測定	2.32	2.53	9.05>1	1.5>0.1	
(c)巻線間容量性測定	1.10	1.13	3.00>1	0.6>0.1	
(d)巻線間誘導性測定	1.19	1.07	12>1	3.9>0.1	
測定方法	第一共振周波数[MHz]			曲線部	
	d=0	d=50	変化率[%]	変化量[dB]	
(a)端子間開放測定	2.68	3.17	18.2>1	0	
(b)端子間短絡測定	2.87	3.36	17.0>1	4.1>0.1	
(c)巻線間容量性測定	1.28	1.28	0	0.5>0.1	
(d)巻線間誘導性測定	1.32	1.23	6.81>1	2>0.1	

#### 5. まとめ

本研究では、単一巻線モデルから検討を始め、二重巻線構造に対して位置ずれを与えた場合の伝達関数の変化について検討を行った。伝達関数の第一共振周波数と右下がり曲線部に着目した場合、端子間短絡測定と巻線間誘導性測定が巻線位置ずれ検出に有効であることが分かった。

#### 文献

- 1) IEC60076-18, Measurement of frequency Response, ED.1, IEC Std. (2012)